

이산형 웨이블릿 변환을 통한 조위 자료 내 파고 성분 분리

유영훈·이명진·이태우^{*}·김수전·김형수

인하대학교 토목공학과

Decomposition of Wave Components in Sea Level Data using Discrete Wavelet Transform

Younghoon Yoo·Myungjin Lee·Taewoo Lee^{*}·Soojun Kim·Hung Soo Kim

Department of Civil Engineering, Inha university, Korea

(Received : 04 November 2019, Revised: 05 November 2019, Accepted: 05 November 2019)

요약

본 연구에서는 울산광역시 태화강 유역의 연안 지역을 대상으로 이산형 웨이블릿 변환을 이용하여 연안 지역의 파고의 영향성을 검토하였다. 이를 위해 Daubechies 7의 기저함수 및 Curve Fitting 함수를 이용하여 조위 자료를 분리한 결과 세분화 성분 내 반일주조성분(d_3), 일주조성분(d_4)의 단주기 성분 및 최종 분해된 근사 성분(a_6)에서는 1년 주기의 장주기 성분을 확인하였다. 6단계로 분해된 조위 자료는 자기상관분석 및 푸리에 변환을 통해 주기성을 가지는 조석 성분과 비주기성을 가지는 파고 성분으로 구분하였다. 최종적으로 조위 자료 내 조석 성분은 66% 및 파고 성분은 34%로 구성되어 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과를 활용한다면, 파고의 영향을 고려한 연안 지역 홍수 관리의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 연안지역, 이산형 웨이블릿 변환, 조위, 파고

Abstract

In this study, we investigated the effect of wave height in coastal areas using discrete wavelet transform in Taehwa river basin in Ulsan. Through the decomposition result of tide data using daubechies level 7 wavelet and Curve Fitting Function, we confirmed that detail components of d_3 and d_4 were semidiurnal and diurnal components and approximation component(a_6) was the long period of lunar fortnight constituent. The decomposed tide data in six level was divided into tide component with periodicity and wave component with non-periodicity using autocorrelation function and fourier transform. Finally, we confirmed that the tide component is consisted 66% and wave component is consisted 34%. So, we quantitatively assessed the effect of wave on coastal areas. The result could be used for coastal flood risk management considering the effect of wave.

Key words : Coastal Area, Discrete Wavelet Transform, Tide, Wave Height

1. 서 론

전 세계 인구의 60% 이상이 연안 지역에 거주하고 있으며, 인구가 250만명이 넘는 도시의 65%가 연안에 위치하고 있다. 국내에서는 인구의 약 30%가 연안지역에 거주하고 산업단지, 항만시설 등 국가 주요 기반시설과 배후도시가 밀집되어 있는 특징을 가지고 있다. 연안 지역에서의 인구활동 증가와 활용성이 증가됨에 따라 자연재난으로 인한 재산 및 인명피해는 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다.

연안 지역은 내륙 지역에 비해 기후변화의 영향으로 인한 집중 호우 및 폭풍 해일에 더욱 취약하며, 해수범람과 하천범람에 의한 복합적인 피해가 발생하고 있다. 최근 국내를 내습한

태풍을 살펴보면 2016년 10월 4일~5일 태풍 'CHABA'의 경우 1시간 침투 강수량 98.7mm 발생과 동시에 161cm의 만조위가 겹쳐 하천에 물이 바다로 배수되지 않아 수위가 정체되면서 저지대에 침수 피해가 발생하였다. 해외에서는 2012년 10월 29일~30일 허리케인 'Sandy'의 경우 미국 동부지역을 강타하여 정전 및 침수피해로 인해 도시 인프라 기능을 마비시킨 사례가 있다. 국내 태풍 'CHABA'와 마찬가지로 허리케인과 동시에 만조위가 겹쳐 연안 지역에 폭풍해일의 직접적인 월류 및 도시 우수관까지 역류로 인한 침수피해가 발생하였다.

위와 같이 연안지역은 조위, 해수면 상승, 집중호우 및 태풍과 너울성 파도 등으로 인한 다양한 재해에 따른 취약성이 크다. 연안지역의 재해와 관련된 최근 국내 연구 사례를 살펴보면 Yoon et al.(2014)은 폭풍해일을 수치모형에 강우와 우수관망을 해석할 수 있는 알고리즘을 추가하여, 우수관 배수 모의 뿐만 아니라 해수의 상승에 따른 역류현상 등을 결합한 수치모형의 기본적인 기능을 검토하였다. Han(2015)은 XP-SWMM 모형을 이용

^{*} To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Inha University, Korea
E-mail: dfd0d7cf@nate.com

하여 강우 및 조위의 복합적인 요소에 따른 재난 취약성을 평가하였으며, 기후변화 시나리오에 따른 미래의 침수 피해 규모를 평가하였다. Lee (2016)는 연안지역 일대에 설치된 우수관의 전 파특성을 수치모의를 통해 분석하여 기상해일 내습 시 우수시스템을 통한 2차 범람에 대해 분석하였다. Lee (2016)는 자연재해에 점차 취약해지는 특성을 보이고 있는 연안 습지를 대상으로, 수리실험을 통해 연안 식생에 의해 외해에서 입사하는 파랑에너지가 감쇠하는 특성을 정량화하였다. Ahn et al.(2017)은 해수면 상승으로 인한 연안지역의 침수에 대한 영향을 평가를 위해 해수면상승 예측 모형과 불규칙 성분을 산정하고 파고자료와 계산된 조위값의 확률밀도함수와 종합하여 Monte Carlo Simulation을 통해 미래 최고해수위를 모의하였다.

국외 연구 사례를 살펴보면 Wamsley et al.(2010)은 파고 수치 모델을 이용하여 습지로 인한 파고의 민감도를 평가하였고, 습지의 형태에 따라 파고의 감쇠 효과가 달라질 수 있음을 확인하였다. Xu et al.(2014)는 Copula-based 모델을 사용하여 강우량과 고조위가 같이 발생할 결합 확률을 도출한 후 연안 홍수 위험 변화를 파악하여 해안지역 홍수 위험 적용 대책에 대한 기초 자료를 제시하였다. Zheng et al.(2014)은 연안 홍수 위험을 추정하기 위해 강우와 폭풍해일 사이의 상호의존성을 3가지 이변량 극치값 분석 방법(threshold-excess method, point process method, conditional method)을 통해 정량화한 결과, 홍수 위험 분석 시 bivariate point-process method를 통한 모델이 강우와 폭풍해일 사이의 의존성을 가장 잘 나타냄을 확인하였다. Chen et al.(2014)은 3차원 모델링 기법을 통해 해안지역 저지대를 대상으로 강우 및 폭풍해일을 모두 고려한 통합 홍수 모델을 구축하였다. 모델을 통해 극한 태풍을 모의하였을 때 하천 상류로부터의 유량 및 폭풍해일의 영향으로 인해 해안지역에 200년 빈도에 해당하는 침수피해가 예상되는 결과를 제시하였다. Lian et al.(2017)은 해안지역의 각 소유역마다 강우와 만조위가 동시에 발생할 때 홍수에 대한 위험도 정량화 및 최적 관리에 대해 분석하였다. 침수 모의를 통해 유역별 홍수 발생 시 주요 요인을 파악하였고, 홍수를 저감시키기 위한 대책 분석 및 비용편익 분석을 통해 최적 관리 방안을 제시하였다.

조위의 경우 하루에 만조 및 간조가 발생하는 단주기와, 여름철에 높은 조위 값을 보이는 장주기 패턴을 보이는 결정론적인 자료이다. 하지만 파고의 경우 강우 및 유출량 등 수문학적 자료와 같이 비선형적인 특성을 보인다. 또한 조위는 단순히 해수면이 상승 및 하강하는 운동에 의해 발생하는 것이 아니라, 해수면 위에서 생기는 풍파와 먼 바다의 너울에 의한 영향도 있다. 시계열 자료 내 많은 특성을 보기 위한 여러 가지 통계 기법이 존재하며, 본 연구에서는 조위 자료 내 특성을 파악하기 위하여 이산형 웨이블릿 변환을 이용하였다. 이산형 웨이블릿 변환은 필터링을 통해 단계별로 자료에서 고주파 성분을 차례로 분해하는 방법이다. 국내에서는 Kwon et al.(2005)은 강수량 자료에 웨이블릿 변환을 적용하여 시간적인 특성을 유지하면서 빈도에 대한 스펙트럼을 효율적으로 평가하였다. Maheswaran et al.(2012)은 웨이블릿 변환을 통해 수문 시계열을 예측할 때, 특정 시계열마다 합리적인 기저함수 선택 방

안을 통해 우수한 결과를 도출할 수 있는 방안을 제시하였다. Abbaszadeh(2016)은 웨이블릿 변환으로부터 잡음 성분을 추출한 강수량 자료를 입력 자료로 구축한 후, 인공신경망 모델을 통해 미래 강수를 예측하는 Optimized Threshold Based Wavelet De-noising(OTWD) 기법을 제안하였다.

위와 같이 웨이블릿 변환은 수문 분야에서 자료의 특성 파악, 분해 및 예측에 관해 주로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 파고 성분이 연안에 미치는 영향을 검토하기 위해 연안에 위치한 조위 관측소의 조위 자료를 조석 성분과 파고 성분으로 분리하여 그 성분을 확인하고자 하였다. 성분을 분리하기 위해 이산형 웨이블릿 변환 및 Curve Fitting 방법을 이용하였으며, 자기상관함수 및 주파수 분석을 통해 분해된 성분들의 주기성을 파악하였다.

2. 파고 성분 추출 방법

2.1 Wavelet Transform (웨이블릿 변환)

시간 영역의 함수를 그래프로 도시하면 x 축은 시간 y 축은 크기의 형태로 표현 가능하다. 함수를 시간 영역의 형태로 표현할 경우 함수 내 정보 및 특징을 쉽게 얻을 수 없지만, 주파수 영역의 형태로 표현할 경우 함수 내 정보 및 특징을 쉽게 파악 가능하다. 시간 영역의 함수는 푸리에 변환(Fourier Transform)을 통해 주파수 영역의 형태로 변환하여 함수 내 정보 및 특징을 파악할 수 있다. 푸리에 변환은 프랑스의 수학자 Joseph Fourier(1822)가 제안한 방법으로 임의의 신호는 시간 영역의 함수에 복소 지수 함수(complex exponential function)를 곱한 합으로 항상 표현 가능하다는 것이며 이는 Eq. (1)과 같다. 시간 영역의 함수 $x(t)$ 는 어떤 특정 주파수 f 에서 복소 지수 함수와 곱한 다음 시간에 걸쳐 적분하여 얻은 값이 크다면 주파수 f 에서 강한 스펙트럼 성분을 보인다 할 수 있으며, 적분하여 얻은 값이 작다면 약한 스펙트럼 성분을 보인다 할 수 있다. 복소 지수 함수는 Euler(1748)에 의해 Eq. (2)와 같이 \sin 함수 및 \cos 함수의 형태로 표현 가능하며, 이 때 \cos 항은 실수부를 \sin 항은 허수부를 의미한다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2j\pi ft} dt \quad (1)$$

여기서, t = 시간, f = 주파수, $X(f)$ = 주파수 영역의 함수, $x(t)$ = 시간 영역의 함수, $e^{j\pi ft}$ = 주파수 f 인 주기함수 성분

$$e^{2j\pi ft} = \cos 2\pi ft + j \sin 2\pi ft \quad (2)$$

시간 영역의 함수가 통계적 특성이 변하지 않는 정상성을 보일 경우 주파수가 시간에 따라 변하지 않고 항상 일정한 주파수를 가지고 있기 때문에, 시간 영역에 상관 없이 푸리에 변환을 통해 스펙트럼 분석을 실시할 수 있다. 하지만 함수가 통계적 특성이 변하는 비정상성을 보일 경우 주파수가 시간에 따라 변하는 특성을 보이기 때문에, 푸리에 변환을 통한 스펙트럼 분석 시 해당 주파수가 어느 시점에 보이는 지 알 수 없다. 즉, 푸리에 변환은

완벽한 주파수의 해상도를 제공하지만, 0에 가까운 시간 해상도를 제공한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 시간 영역의 함수 $x(t)$ 에 창함수(window function) 곱하여 국부적인 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform, STFT)을 적용할 경우 Eq. (3)과 같이 함수를 시간-주파수의 형태로 표현 가능하다.

$$STFT(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t-t') e^{-2j\pi ft} dt \quad (3)$$

여기서, $w(t)$ = 창함수(window function)

STFT는 창함수로 정의되는 일정한 구간 안에서 시간 영역의 함수가 정상성의 특성을 가질 때 주파수로 변환함으로써 시간-주파수 분석을 수행한다. 하지만 STFT는 창함수의 폭(width)에 따라 국부적으로 시간-주파수 형태의 표현하게 된다. 창함수의 폭이 좁아질수록 신호 내 시간 해상도는 좋아지지만 주파수의 해상도는 떨어진다. 반대로, 창함수의 폭이 넓어질수록 시간 해상도는 떨어지며, 폭이 무한히 커진다면 일반적인 푸리에 변환과 마찬가지로 완벽한 주파수의 해상도 및 0에 가까운 시간 해상도를 제공하게 된다. 즉, STFT는 창함수 폭에 따라 고정된 시간-주파수 해상도 분해능을 보이게 되며, 시간 및 주파수의 해상도는 서로 반비례 관계를 보인다. 위와 같이 해상도의 문제점을 극복하기 위하여 창함수 대신에 기저함수(mother wavelet)를 이용한 시간-주파수 분석을 웨이블릿 변환이라 한다.

2.1.1 연속형 웨이블릿 변환 (Continuous Wavelet Transform)

기저함수를 이용한 웨이블릿 변환은 Eq. (4)와 같은 형태로 나타낼 수 있으며, 이 때 기저함수는 Eq. (5)와 같이 전이(Shifted) 변수 및 규모(Scale) 변수로 나타낼 수 있다.

$$CWT(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt \quad (4)$$

$$\psi_{\tau, s}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (5)$$

여기서 ψ = 기저함수(mother wavelet), τ = 전이(Shift) 변수, s = 규모(scale) 변수

시간적으로 무한한 sin 및 cos 함수를 기본함수로 사용하는 푸리에 변환과 달리, 웨이블릿 변환은 시간적으로 한정되어 있는 기저함수를 기본 함수로 사용한다. 또한 Fig. 1과 같이 푸리에 변환은 시간 영역을 주파수 영역으로 변환하여 스펙트럼 분석을 실시하였기 때문에 시간에 대한 정보를 알 수 없다. 일정한 폭을 가진 창함수를 이용하는 STFT는 시간과 주파수의 해상도가 동시에 좋아질 수 없는 반면에, 웨이블릿 변환은 전이 변수와 규모 변수를 이용하여 기저함수를 Shifting(이동)하고 Scaling(확장 및 축소)함으로써 다중 해상도 분석(Multi-resolution Analysis)을 수행할 수 있다.

Fig. 2와 같이 규모 변수가 1보다 클수록 저주파수에 해당하는 확장된 기저함수를 생성하게 되며, 0과 1사이의 값을 가지

면 고주파수에 해당하는 축소된 기저함수를 생성한다. 확장된 기저함수는 장주기의 변화를 파악하며, 축소된 기저함수는 단 주기의 변화를 파악하는 차이점이 있다. 확장 및 축소된 기저함수는 시간에 따라 이동하면서 시간 영역의 함수와 비교를 통해 웨이블릿 계수(wavelet coefficient)를 산정한다. τ 시점에서 시간 영역의 함수와 기저함수가 유사한 경우 웨이블릿 계수는 크게 산정되며, 다른 경우 계수는 작게 산정된다. 위 과정과 같이 기저함수를 이용하여 신호 및 시계열이 진동하는 특성을 고해상도의 시간-주파수 함수로 표현하기 위한 방법을 연속형 웨이블릿 변환이라 한다.

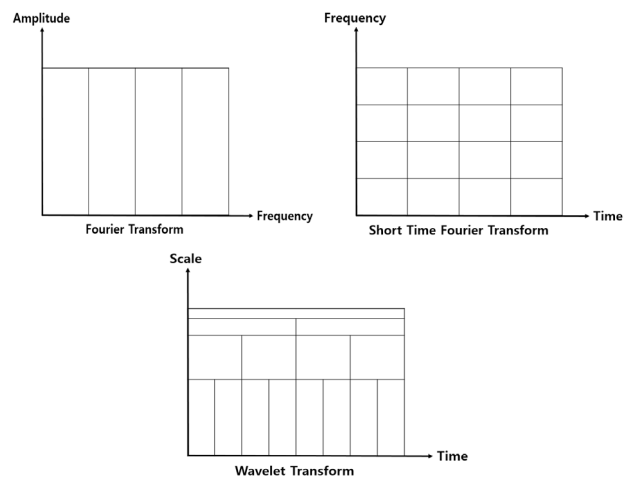


Fig. 1. Comparison of Frequency Domain Analysis in Signal and Time Series

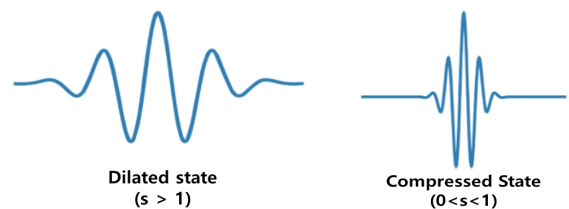


Fig. 2. Comparison of Mother wavelet by scale parameter

2.1.2 이산형 웨이블릿 변환 (Discrete Wavelet Transform)

연속형 웨이블릿 변환은 기저함수의 이동 및 확장을 통해 산정된 웨이블릿 계수를 통해 시간-주파수 분석을 실시하지만, 무한 개의 기저함수를 고려하기 때문에 과도한 계산과정으로 인해 중복된 정보가 많이 발생하게 된다. 따라서 연속형 웨이블릿 변환의 개념에서 전이 및 규모 변수를 무한히 고려하지 않고 이산화하여, Eq. (6)과 같이 웨이블릿 계수를 산정하는 방법을 이산형 웨이블릿 변환이라 하며, 이 때 기저함수는 Eq. (7) 같이 나타낸다.

$$DWT(m, j) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m, j}^*(t) dt \quad (6)$$

$$\psi_{m, j}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-2^j m}{2^j}\right) \quad (7)$$

이산형 웨이블릿 변환은 연속형 웨이블릿 변환에서 제공하는

과도한 정보를 일정한 비율로 조정된 매개변수 통해 웨이블릿 계수를 샘플링하여 원하는 정보를 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다. 시간 영역의 함수 내 큰 규모 변수를 갖는 부분은 저주파수에 해당하는 부분으로, 이는 시간 내 전반적으로 보이는 특성이기 때문에 많은 웨이블릿 계수를 필요로 하지 않는다. 연속형 웨이블릿 변환에서는 시간 내 무한한 영역에서 기저함수의 확장, 축소 및 이동함에 따라 시간-주파수 분석을 수행했다면, 이산형 웨이블릿 변환은 피라미드 원칙에 의해 분석을 수행한다. 이 때 기저함수는 고주파수 및 저주파수를 구분하는 필터링 역할을 통해, 시간 영역의 함수는 그림 3과 같이 High-pass filter를 통과하는 세분화(detail) 성분과 Low-pass filter를 통과하는 근사(approximation) 성분으로 분해된다. 이 때 최종 단계까지 분리된 근사 성분(a_n)과 분해 단계 별 세분화 성분(d_1, d_2, \dots, d_n)을 모두 더하게 되면 $F(x)$ 의 형태를 보이게 된다.

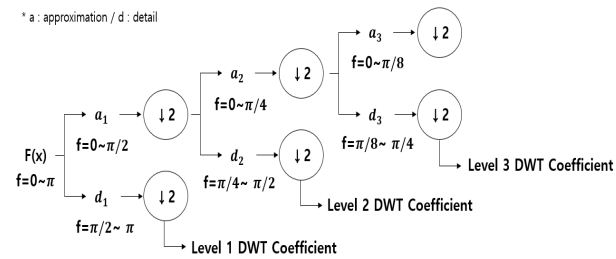


Fig. 3. The Pyramid Algorithm of Discrete Wavelet Transform

2.2 Curve Fitting

Curve Fitting은 신호 및 시계열을 가장 잘 표현할 수 있는 함수들을 이용하여 직선 또는 곡선을 얻는 방법을 말한다. Curve Fitting의 종류는 크게 최소제곱법(Least Square Method)과 보간법(Interpolation)으로 구분된다. 최소제곱법은 주어진 신호 및 시계열을 근사화 시키는 것으로, 추정된 함수가 자료를 통과하지는 않지만 오차를 최대한 줄여서 다항식을 추정하는 방법이다. 보간법의 경우에는 데이터가 매우 정확하게 알려져 있는 경우 사용되며 선형 보간법(Linear interpolation) 및 다항 보간법(Polynomial interpolation)으로 구분된다. 본 연구에서는 주기를 가지는 결정론적인 자료인 조위 성분의 장주기(연주기) 성분을 추출하기 위해 sin 함수로 구성된 다항 보간법을 사용하였고, 이는 Eq. (8)와 같다.

$$f(t) = a_1 \sin(b_1 \times x + c_1) + a_2 \sin(b_2 \times x + c_2) + \dots + a_n \sin(b_n \times x + c_n) \quad (8)$$

3. 조위 자료를 이용한 파고 성분 추출

3.1 대상 지역 및 자료 구축

본 연구에서는 한반도의 주요 태풍 경로인 남해안 지역 중 2016년 태풍 'CHABA'에 의해 큰 피해가 발생한 태화강 유역을

대상유역으로 선정하였다. 태화강 하류에는 태화강 국가정원 생태습지 및 조위의 영향을 받는 감소하천이 존재하고 있으며, 태풍 내습 시 조위의 영향으로 인해 하천의 고수위가 지속되어 침수피해를 발생시킨 사례가 있다. 대상 지역 내 관측소는 국립해양조사원의 울산 조위 관측소와, 해역 부근에 기상청 파고부이 관측 장비가 존재하고 있다 (Fig. 4).

울산 조위관측소의 2014년 1월 1일~2018년 12월 31일까지의 1시간 간격 조위 시계열 자료를 수집하였고, 이를 Fig. 5에 도시하였다. 조위는 경우 달과 태양에 의한 인력과 지구의 회전력에 의한 원심력의 영향으로 발생하는 조석 운동으로 인해 해수면의 높이를 말하며, 약 1일 주기로 진동하는 특성과 1년 주기로 진동하는 특성을 확인할 수 있다. 조석 운동은 Table 1과 같이 단주기 성분의 단일주조성분 및 일주조성분과 장주기

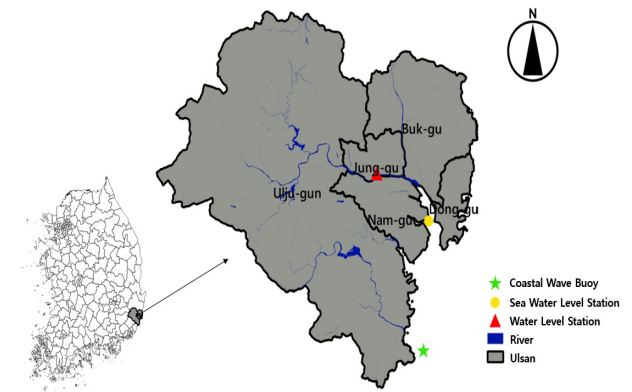


Fig. 4. Study Area in Ulsan, Korea

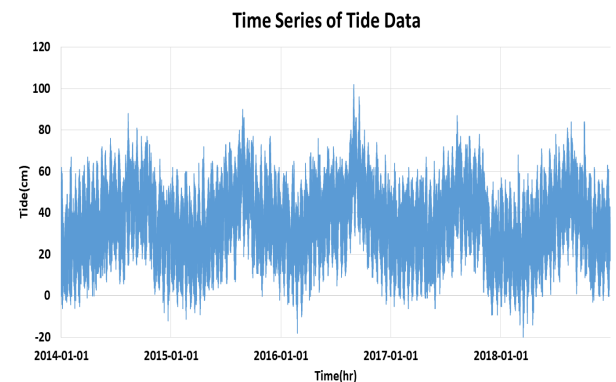


Fig. 5. Time Series of Tide Data in Ulsan

Table 1. Main Tidal Constituents

Tidal Constituents	Symbol	Period(hr)
Semidiurnal Constituents	M_2	12.42
	S_2	12.00
	N_2	12.66
Diurnal Constituents	K_1	23.94
	O_1	25.82
	P_1	24.07
Lunar fortnightly Constituents	M_f	327.67

성분의 장주기조성분으로 구분될 수 있다. 또한 조화 분해를 통해 약 60개의 분조로 표현될 수 있으며, 이 때 단일주조 성분의 M_2 , S_2 및 일주조성분의 K_1 , O_1 을 조석 운동의 주요 4대 분조라 한다. 본 연구에서는 파고가 연안지역에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 연안지역에 위치한 조위 관측소의 조위 자료를 이용하여 조석 성분과 파고 성분으로 분리하였고, 각 성분의 비율을 검토하고자 하였다.

3.2 조위 자료 분해 및 주기성 분석

조위 자료는 조석 운동에 의해 주기적인 패턴을 보이고 있으며, 주기성을 추출하기 위해 이산형 웨이블릿 변환을 수행하였다. 웨이블릿 변환 시 사용될 수 있는 기저함수는 Daubechies(db),

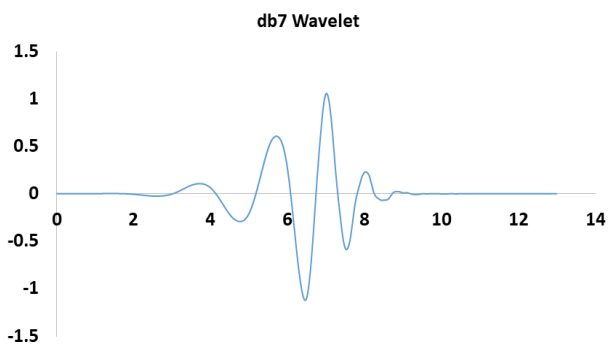


Fig. 6. Mother Wavelet :Daubechies Wavelet (db7)

Symlets(sym), Coiflets(coif), Biorthogonal(bior), Mexican Hat(mexh) 등이 존재하며, 본 연구에서는 Fig. 6의 Daubechies 7 wavelet을 이용하였다. 이산형 웨이블릿 변환 시 선정된 db7 기저함수는 시계열의 고주파 및 저주파를 구분하는 필터링 역할을 하게 되며, 조위 자료를 총 6단계로 분해한 결과를 Fig. 7과 같이 나타내었다.

조위 시계열 자료(s)로부터 분해된 $d_{1..6}$ 는 각 단계별 High Pass Filter를 통과한 세분화 성분을 나타내는 것이며, a_6 는 조위 시계열 자료(s)로부터 $d_{1..6}$ 이 추출된 최종 근사 성분을 의미한다. 이 때 모든 세분화 성분($d_{1..6}$)과 최종 근사 성분(a_6)을 합하면 기존 조위 시계열(s)이 된다. 각 단계 별 세분화 성분을 통해 조위 시계열 자료 내 진동하는 특성이 단계별로 분해된 것을 확인할 수 있으며, d_1 은 세분화 성분 내 가장 주파수가 큰 성분이며, d_6 는 가장 주파수가 작은 성분이다. 6단계로 분해되고 남은 근사 성분(a_6)은 저주파수 성분이 남아있으며, 1년 단위의 장주기 성분이 명확히 보이는 것을 확인하였다.

분해된 성분들을 이용하여 조위 시계열 자료를 조석 성분 및 파고 성분으로 분리하기 위하여, 각 세분화 성분들의 자기상관 분석(Autocorrelation Function, ACF)을 통해 주기성 여부를 확인하였고, 이를 Fig. 8에 도시하였다. 자기상관분석은 시간 영역의 함수 $x(t)$ 와 임의의 시간 k만큼 지연시킨 $x(t+k)$ 사이의 상관관계를 파악하여 주기성 여부를 파악할 수 있다. 세

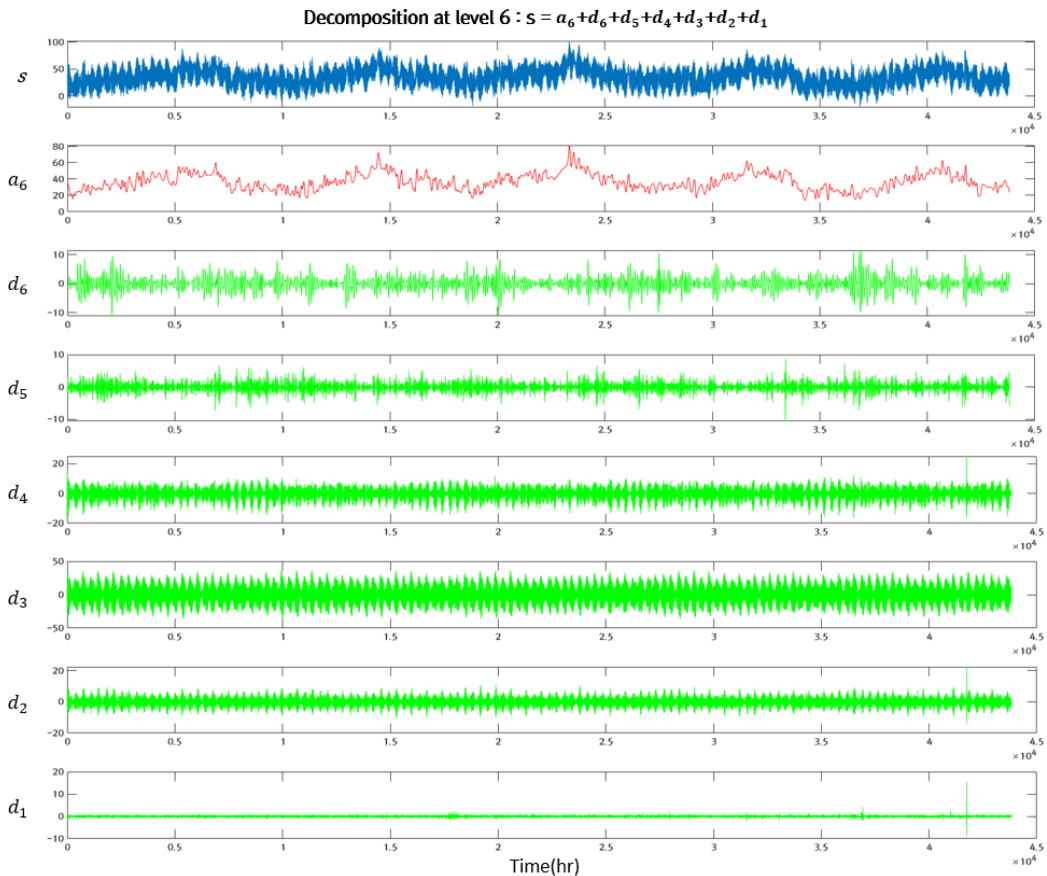


Fig. 7. Decomposition of Tide Time Series using Discrete Wavelet Transform

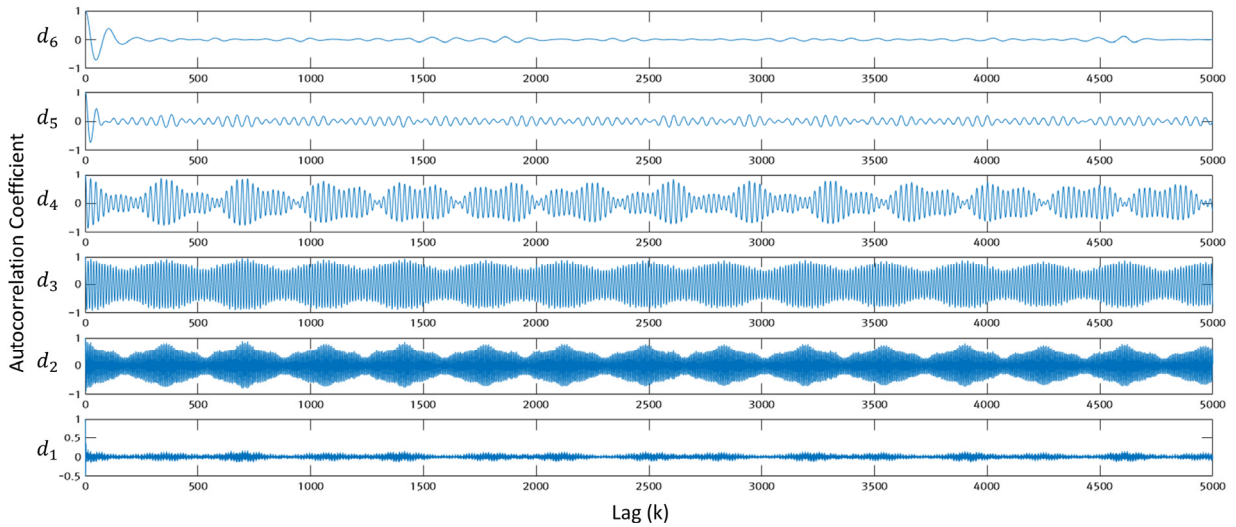


Fig. 8. Autocorrelation Coefficient of each Detail Components

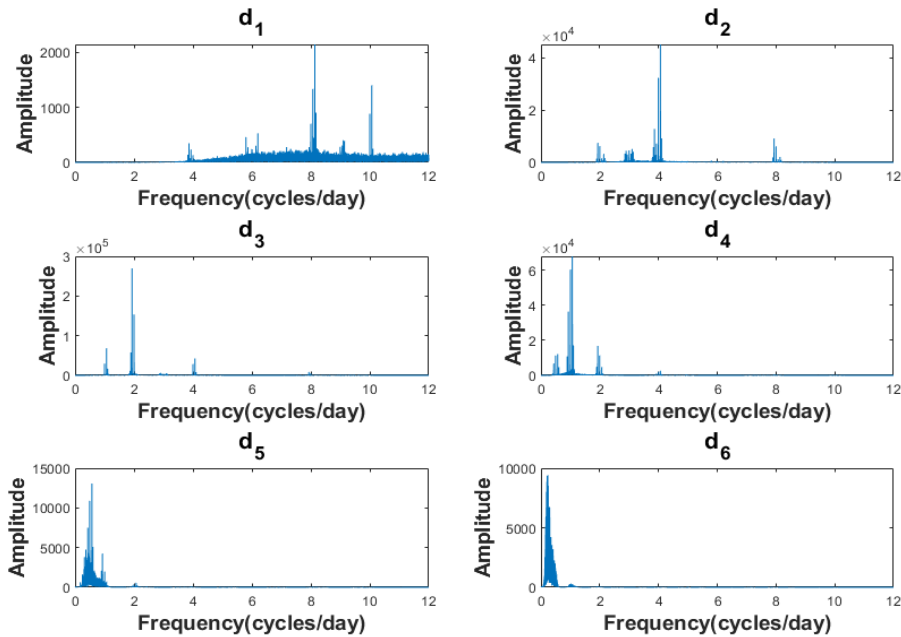


Fig. 9. Frequency domain analysis of each detail components using Fourier Transform

분화 성분 d_1 , d_5 및 d_6 의 경우 자기상관계수가 0 주변을 진동 하면서 주기성이 없는 것을 확인하였으며, d_2 , d_3 및 d_4 의 경우 자기상관계수가 일정한 범위 내 불규칙한 패턴이 반복되는 준주기성을 보이고 있음을 확인하였다.

각 세분화 성분들이 보이는 패턴 및 주기를 정량화하기 위해, Fig. 9와 같이 푸리에 변환을 이용한 스펙트럼 분석을 통해 시간 영역의 함수를 주파수 영역으로 나타냈다. 스펙트럼 분석 시 x축은 하루 당 주기 수(cycle/day)로 표현하였으며, y축은 해당 주파수의 세기에 해당한다. 먼저 d_1 의 경우 하루 당 약 8회의 주기를 가진 주파수의 세기가 제일 강한 것으로 나타났으며, d_2 의 경우 약 4회, 그리고 d_6 의 경우 약 0.5회 주기를 가진 주파수가 강했으며, n번째 세분화 성분은 하루 당 약 2^{1-n} 회의 주기를 가진 주파수

의 크기가 강한 것을 확인하였다. 이 때, d_1 의 경우 강한 주기를 가진 주파수가 약 2,000의 크기를 보이고 있으며, d_5 및 d_6 의 경우 해당 주파수별 약 13,000 및 9,400의 작은 크기를 보이고 있음을 확인하였다. 이와 반대로, d_2 의 경우 약 45,000, d_3 의 경우 약 270,000 및 d_4 의 경우 약 69,000으로 상대적으로 d_1 , d_2 및 d_5 에 비해 강한 세기를 보이고 있음을 확인하였다. 이 중 d_1 의 경우 하루 당 1회의 주기를 가진 주파수의 세기가 가장 큰 결과를 보이므로 조석 성분 중 일주조성분에 해당하며, d_3 의 경우 하루 당 2회의 주기를 보이는 반일주조성분에 해당한다. 근사 성분 a_6 의 경우 조위 시계열 내 고주파수 성분이 모두 추출된 성분으로, 남아있는 1년 주기의 장주기 성분을 추출하기 위해 Curve Fitting 이용하였으며, 사용된 Curve Fitting 함수는 Fig. 10에 나타내었다.

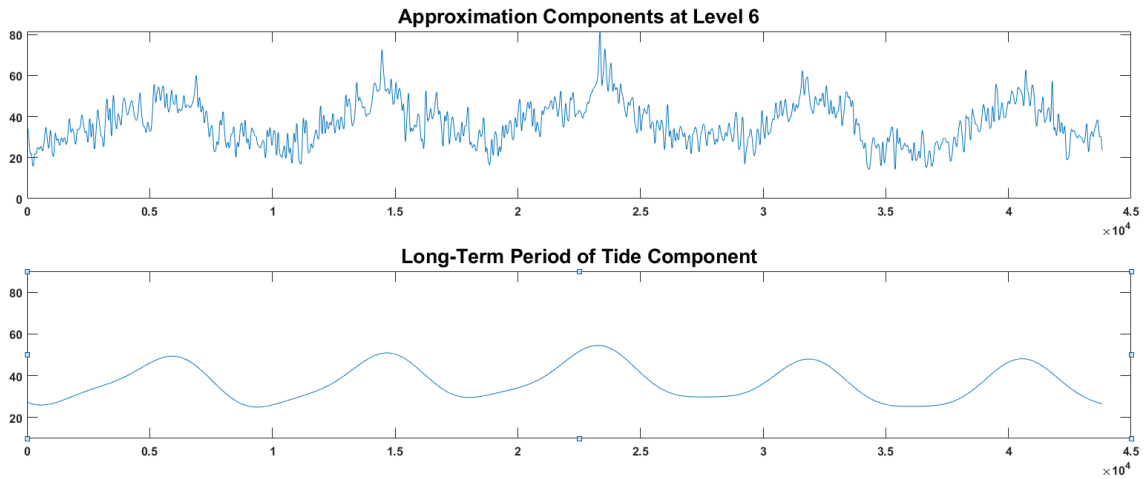


Fig. 10. Decomposition of Long-Term period component of Tide Data using Curve Fitting Function

3.3 파고 성분 추출 및 정량적 평가

파고 성분은 조석 성분과 다르게 강수량, 수위, 유량 등의 수문학적 자료와 같이 비선형적 특성을 보이는 확률론적 함수라고 할 수 있다. 이산형 웨이블릿 변환을 통해 조위 시계열 자료를 단계별 세분화 성분 및 최종 근사 성분으로 분해하였고, 각 세분화 성분에 스펙트럼 분석을 실시한 결과 주기성이 보이는 성분과 비주기성이 보이는 부분으로 구분할 수 있었다. 따라서 단주기성을 가진 d_2 , d_3 및 d_4 의 세분화 성분 및 6단계 근사 성분으로부터 추출된 장주기 성분의 합을 주요한 조석 성분으로 구성하였고, 그 외 나머지 성분을 합하여 최종적으로 조위 시계열 자료로부터 조석 성분 및 파고 성분을 분리하였으며, 이를 Fig. 11에 도시하였다.

조석 성분은 주기성이 있는 주요 성분들의 합으로 구성되어 Fig. 11 왼쪽 아래 그림에 도시하였고, 파고 성분은 조위 성분

에 주기 성분을 제외한 성분들의 합으로 구성되어 오른쪽 아래 그림에 도시하였다. 조위 자료는 기본적으로 단주기, 중주기 및 장주기를 가지는 조석 운동에 의한 해수면 높이의 변화로, 자료와 조석 성분 사이에 상관계수는 0.92 및 결정계수 R^2 이 0.85를 보였다. 파고 성분의 경우 조위 자료 내 비주기적인 성분들의 합으로 구성되어 있으며, 조석 성분 및 파고 성분을 더하게 되면 원래 조위 시계열 자료로 재구성된다. 최종적으로 모의 기간 내 조위 자료는 약 66%의 조석 성분과 약 34%의 파고 성분으로 구성되어 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 연안 지역의 파고가 미치는 영향성을 검토하기 위하여, 연안에 위치한 조위 관측소의 조위 시계열을 조석

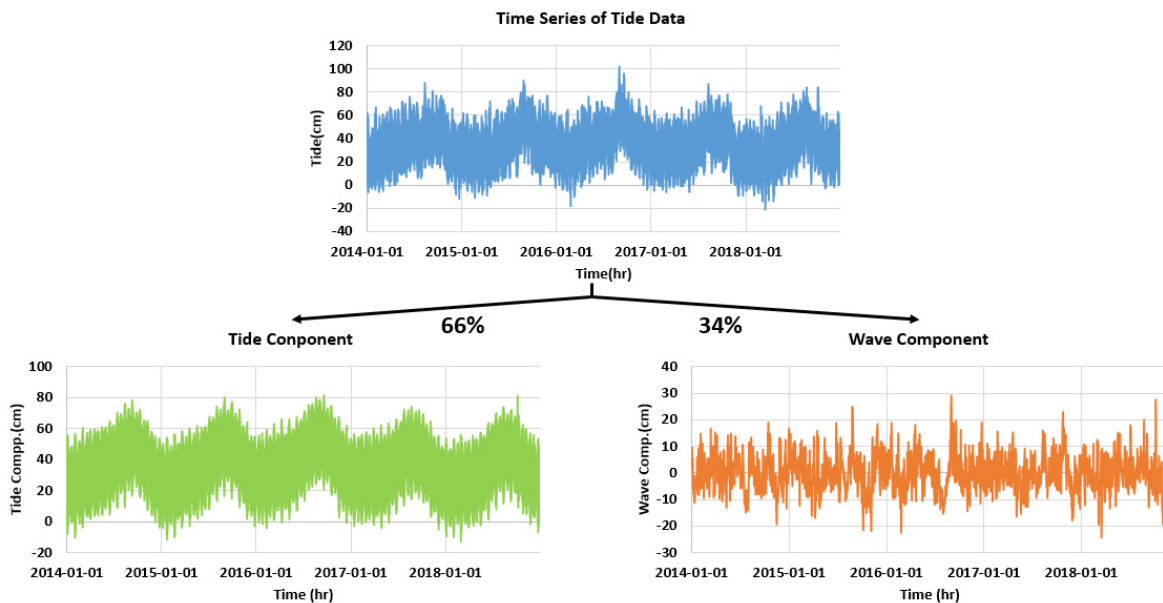


Fig. 11. Tide and Wave Components Rate in the Time Series of Tide

성분 및 파고 성분으로 분리하였다. 계산 과정이 복잡하지 않고, 고해상도의 시간-주파수 분석이 가능한 이산형 웨이블릿 변환을 이용하여 선형적 특성을 보이는 조석 성분과 비선형 특성을 보이는 파고 성분을 분리하였다.

2016년 태풍 'CHABA'로 인해 큰 피해가 발생한 울산광역시를 대상 지역으로 선정하였고, 연안 지역의 조위 자료 및 파고자료를 수집하였다. 웨이블릿 변환을 통해 조위 시계열을 6 단계별 세분화 성분 및 근사 성분으로 분해하였고 각 성분 별 주기성 여부를 파악하기 위해 자기상관분석 및 스펙트럼 분석을 실시하였다. 세분화 성분 d_2 , d_3 및 d_4 의 경우 자기상관함수를 통해 준주기성을 보이는 것을 확인하였으며, 주파수 영역으로 표현하였을 때 주기성에 해당하는 주파수의 세기가 강하게 나타나는 것을 확인하였다. Curve Fitting을 통해 근사 성분 a_6 에 존재하는 장주기 성분을 추출하였으며, 최종적으로 주기성을 가진 성분들의 합을 통해 조석 성분을 구축하였고, 나머지 성분을 이용하여 파고 성분을 구축하였다. 조위 자료 내 조석 성분은 약 66% 및 파고 성분은 약 34%를 차지하고 있음을 확인하였고, 자료와 조석 성분 사이의 상관계수는 0.92 및 결정계수 R^2 은 0.85를 보이며 조석 성분이 잘 분해되었음을 확인하였다.

본 연구는 기후변화로 인한 해수면 상승, 태풍 등의 재해에 취약한 연안 지역을 대상으로 파고에 대한 영향성을 검토하였다. 기상청 해양 장비 및 국립해양조사원의 해양관측부이에서 제공하는 파고 자료의 경우 내륙 지역과 거리가 먼 곳에서 관측을 실시한다. 이에 비해 조위관측소의 경우 내륙과 인접하여 해수의 높낮이는 관측하는 자료로, 조석의 영향을 받아 주기적인 운동을 보이고 있지만 근해의 풍파 및 먼 바다의 너울로 인한 영향도 포함되어 있다. 추후 연구에서는 비주기성을 가지고 있는 파고 성분과 인근 관측소 파고 자료와의 비교를 통해 연안 지역의 파고 성분에 대한 영향성을 정량화 할 예정이다. 본 연구 결과를 활용한다면 태풍 및 폭풍 해일 등의 의해 연안 지역에 파고가 상승하였을 때, 연안 지역의 미래 홍수 위험 관리에 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 물관리 연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다. 이에 감사드립니다. (RE201901039).

References

- Abbaszadeh, P. (2016). Improving hydrological process modeling using optimized threshold-based wavelet de-noising technique. *Water resources management*, 30(5), pp. 1701-1721. [DOI 10.1007/s11269-016-1246-5]
- Ahn, SK, & Lee, DK. (2017). Estimation of Peak Water Level Based on Observed Records and Assessment of Inundation in Coastal Area - A Case Study in Haeundae, Busan City -, Korean Society of Environmental Impact Assessment, 26(6), pp. 445-456. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.14249/eia.2017.26.6.445>]
- Baron Fourier, J. B. J. (1822). *Théorie analytique de la chaleur*. F. Didot.
- Chen, W. B., & Liu, W. C. (2014). Modeling flood inundation induced by river flow and storm surges over a river basin. *Water*, 6(10), pp. 3182-3199. [DOI <https://doi.org/10.3390/w6103182>]
- Euler, L. (1748). *Introductio in analysin infinitorum* (Vol. 2). MM Bousquet.
- Haar, A. (1910). Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme. *Mathematische Annalen*, 69(3), pp. 331-371. [DOI <https://doi.org/10.1007/BF01456326>]
- Han, HC (2015). *Inundation Analysis of Coastal Urban Area Considering Sea Level Rise and Overflow of Drainage System Under Climate Change*, Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea. [Korean Literature]
- Kang, JW, Kim, YS, Cho, HY & Shim, JS (2011). Characteristics of Nearshore Surge-Intensity. *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 23(6), pp. 458-465. [Korean Literature]
- Kang, JW, Kim, YS & Cho, HY (2013). Decomposition of Tidal Residual Data Using a Wavelet Method and Characteristic. *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 25(3), pp. 165-171. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.3.165>]
- Kim, HK, & Kim, YT. (2013). Characteristics of Spatio-temporal Variability of Daily averaged Tidal, J. of the Korean Society of Marine Environment & Safety Residuals in Korean Coasts, 19(6), pp. 561-569. [Korean Literature] [<https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.6.561>]
- Kwon, HH, & Moon, YI. (2005). Analysis of Hydrologic Time Series Using Wavelet Transform. *Korea Water Resources Association*, 38(6), pp. 439-448. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2005.38.6.439>]
- Lee, MJ, You, YH, Kim, SJ, Kim, KT, & Kim, HS. (2018). Decomposition of Water Level Time Series of a Tidal River into Tide, Wave and Rainfall-Runoff Components. *Water*, 10(11), pp. 1568. [DOI <https://doi.org/10.3390/w10111568>]
- Lee, SY (2016). Numerical Analysis of the likelihood of secondary flooding characteristics of coastal areas by the storm via a drainage system, Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Lee, SD (2016). Characteristics of Wave Attenuation with Coastal Wetland Vegetation. *J. of Wetlands Research*, 18(1), pp. 84-93. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2016.18.1.084>]
- Lian, J., Xu, H., Xu, K., & Ma, C. (2017). Optimal management

- of the flooding risk caused by the joint occurrence of extreme rainfall and high tide level in a coastal city. *Natural Hazards*, 89(1), pp. 183–200. [DOI <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2958-4>]
- Maheswaran, R., & Khosa, R. (2012). Comparative study of different wavelets for hydrologic forecasting. *Computers & Geosciences*, 46, pp. 284–295. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.12.015>]
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Giard, D. (1982). Wave propagation and sampling theory—Part II: Sampling theory and complex waves. *Geophysics*, 47(2), 222–236. [DOI <https://doi.org/10.1190/1.1441329>]
- Muraleedharan, G., Lucas, C., Soares, C. G., Nair, N. U., & Kurup, P. G. (2012). Modelling significant wave height distributions with quantile functions for estimation of extreme wave heights. *Ocean Engineering*, 54, pp. 119–131. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.07.007>]
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, 27(3), pp. 379–423. [DOI <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>]
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis*. Intergovernmental panel on climate change, working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). New York.
- Wamsley, T. V., Cialone, M. A., Smith, J. M., Atkinson, J. H., & Rosati, J. D. (2010). The potential of wetlands in reducing storm surge. *Ocean Engineering*, 37(1), 59–68.
- Wang, W., & Ding, J. (2003). Wavelet network model and its application to the prediction of hydrology. *Nature and Science*, 1(1), pp. 67–71.
- Xu, K, Ma, C, Lian, J., & Bin, L. (2014). Joint probability analysis of extreme precipitation and storm tide in a coastal city under changing environment. *PloS one*, 9(10), e109341. [DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109341>]
- Yoon, SB, Lee, JH, Kim, KH, & Song, JH. (2014). Development of Storm Sewer Numerical Model for Simulation of Coastal Urban Inundation due to Storm Surge and Rainfall, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(6), pp. 292–299. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2014.26.5.292>]
- Zheng, F., Westra, S., Leonard, M., & Sisson, S. A. (2014). Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk. *Water Resources Research*, 50(3), pp. 2050–2071. [DOI <https://doi.org/10.1002/2013WR014616>]

〈저자소개〉

Younghoon Yoo

Inha university
Graduate student / dudgns5971@naver.com

Myungjin Lee

Inha university
Ph.D candidate / lmj3544@naver.com

Soojun Kim

Inha university
Professor / sk325@inha.ac.kr

Hung Soo Kim

Inha university
Professor / sookim@inha.ac.kr

Taewoo Lee

Inha university
Graduate student / dfd0d7cf@nate.com